

人工智能在化工事故预测与预防中的应用探索

李永超 王春元

山东京博石油化工有限公司, 山东 滨州 256500

[摘要]人工智能可为化工事故预测及预防搭建数据到行动的完整闭环路径,整合传感器、报警信息、检维修记录及作业票据等多类数据,处理数据缺失、噪声与漂移问题,强化小样本数据效果,抓取事故早期特征,完成时序异常监测与阈值自主调整;针对失控反应、超温超压等工况运用因果推断与机理验证方法,绘制装置层级动态风险分布图,辅助预警分类处理与连锁联动操作。搭配可解释结果输出、不确定性量化分析、合规管控及审计追溯体系,强化预防措施的落地能力与可靠程度。

[关键词]化工安全;事故预测;智能预警;风险评估;可解释模型

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19574

中图分类号: TQ055.8

文献标识码: A

Application Exploration on Artificial Intelligence in Chemical Accident Prediction and Prevention

LI Yongchao, WANG Chunyuan

Shandong Chambroad Petrochemicals Co., Ltd., Binzhou, Shandong, 256500, China

Abstract: Artificial intelligence can build a complete closed-loop path from data to action for chemical accident prediction and prevention, integrating various types of data such as sensors, alarm information, maintenance records, and work tickets, handling data loss, noise, and drift problems, enhancing the effectiveness of small sample data, capturing early characteristics of accidents, and completing temporal anomaly monitoring and threshold autonomous adjustment; Using causal inference and mechanism verification methods for out of control reactions, over temperature and over pressure conditions, draw a dynamic risk distribution map at the device level to assist in warning classification processing and interlocking linkage operations. By combining interpretable result output, uncertainty quantification analysis, compliance control, and audit traceability system, the implementation ability and reliability of preventive measures are strengthened.

Keywords: chemical safety; accident prediction; intelligent warning; risk assessment; interpretable model

引言

化工装置事故多由细小异常累积演变,仅依靠常规巡检与固定阈值无法快速锁定风险转折节点。高频过程数据、报警事件序列、检维修资料与作业单据不断产生,为风险辨识搭建出可量化的支撑条件。人工智能可整合多维度信息,捕捉泄漏、燃爆、失控反应等工况的异常趋势,把预警信息转换成分级处理、连锁响应与作业管控措施。核心是数据品质、工况偏移、可解释性与合规安全同步推进,让预测切实作用于事故防范。

1 化工事故风险链条与人工智能介入价值界定

1.1 事故诱因的多因素耦合与前兆特征提炼

化工事故诱因多表现为工艺条件、设备状态、物料特性与操作行为的耦合作用:原料参数波动改变反应热释放强度,冷却效能减弱带动温度压力同步攀升,密封构件老

化配合设备振动加剧催生介质泄漏路径。多源信号能够提取事故前兆特征:温度斜率偏离常规、压力脉动频段偏移、流量与液位关联关系失效、报警频次短时集中、泵阀电流及振动数值同步抬升;融合 DCS 运行趋势、SIS 动作日志、红外气体成像与声发射监测信号,构建可辨识事故失控发展过程的特征体系。

1.2 预测与预防目标的指标体系与评价口径统一

预测与预防需将“预警有用”转化为可考核指标:预测端考量提前量窗口、检出率、误报率、漏报率、稳定性与工况迁移下的性能弱化;预防端考量风险等级变动、连锁触发前的干预成功率、异常处理耗时、停工损失与隐患闭环周期^[1]。评价体系需增设事件分层判定条件,将“报警触发”“参数越限”“保护层动作”“人员干预”对应的事件级别明确界定,设定时间窗划分与同因事件合并规则,

规避单次波动被拆解为多条记录。装置启停、工况切换、检修复运等特殊时段单独设定基准与阈值，避免正常工况波动被误判为异常状态。同步厘清数据来源优先级、数据缺失补全标识与复核程序，保障各系统、各班次输出结果统一，为横向对比与趋势研判提供支撑。

1.3 工艺机理约束与数据驱动协同的适用边界梳理

数据驱动模型在工况稳定、传感器覆盖完整、历史异常样本可追溯的条件下更易输出稳定预警，连续过程中换热衰减、泵阀损耗、管网压降异常均可实现有效监测；强非线性反应、配方频繁调整、装置改造后数据分布突变的环境下，仅依靠相关性分析易出现判断误差。机理约束依托物料衡算、能量衡算、反应动力学及设备特性曲线划定合理区间，约束违背物理规律的模型输出，数据稀疏的高危工况可借助机理仿真生成对比样本。适用边界需结合装置工艺复杂程度与工况稳定状态，划分连续稳定生产与配方频繁切换两类场景；高危单元需匹配更细的解释维度与更严格的误报管控标准。SIS 联动相关应用需核算停机成本、联锁旁路管控与人工确认流程，划定“建议-确认-执行”的操作权限。数据合规环节需核查跨网传输、敏感信息脱敏、存储时长与审计记录，规避合规风险对运行安全造成的反向影响。

2 多源异构数据治理与事故前兆样本构建方法体系

2.1 传感器报警检修记录作业票据的数据融合

传感器测点与报警日志依托标签体系搭建框架，要和设备台账、检维修工单、作业票据形成统一对象标识及层级关联，打通“装置-单元-设备-部件-测点”全链条。时间层面执行统一时钟与采样精度，完成 DCS 连续曲线、SIS 动作、报警事件流的时序匹配；文本类记录梳理设备名称、故障模式、处理方案与替换部件信息，生成标准化数据字段。数据映射以票据审批时刻、开工核验、完工销项为核心节点，划定作业起止区间与缓冲范围，囊括准备及收尾环节的参数波动。趋势片段同步标记作业场地、介质类型、隔离手段、检测频率与监护就位情况，配合可燃气体浓度、通风条件、阀位变动等信号完成交叉核对。作业后报警若持续或反复生成，可直接追溯关联工单与替换部件批次，定位处理疏漏与隐患重复出现的规律。

2.2 缺失噪声漂移工况切换下的数据清洗与校准策略

江苏响水天嘉宜“3·21”事故监控视频记录 14 时 45 分 35 秒库房顶部出现冒烟，14 时 48 分 44 秒突发爆炸，事故致使 78 人遇难、直接经济损失达 198635.07 万元；调查认定硝化废料在绝热环境中 163.6°C 可发生自燃，初

始温度 39.2°C 条件下贮存一年即可攀升至自燃温度，旧固废库内部废料最长贮存时长超七年、总量约 600t 袋^[2]。针对此类长期过程数据，清洗环节需划分工况切换区间，依据负荷与季节重新构建数据基线；数据缺失段落借助工艺约束完成插补并同步标注置信度；温度、压力等慢变量通过漂移检测与周期校验记录联动调整，高频噪声依托稳健滤波留存关键斜率及突变特征，防止渐进升温被判定为随机波动。

2.3 小样本稀缺事故场景的合成增强与标注规范设计

稀缺事故样本可借助机理仿真与历史工况重放生成“前兆-发展-临界”序列，通过生成模型对噪声水平、采样间隔、传感器失效模式施加扰动，构建涵盖更多边界条件的训练集。标注规范需界定事件本体与时间窗：划分工况切换、设备退化、操作波动、保护层动作等类型；采用多级严重度与可处置标签，明确起点、峰值、恢复点的统一判据；对不确定片段运用弱标签与置信区间，搭配一致性检验与复核机制，降低同一信号在不同班次、不同装置间的标注口径偏差。

3 面向关键场景的事故预测模型与动态风险评估框架

3.1 泄漏火灾爆炸场景的时序异常检测与阈值自适应

泄漏与燃爆多呈现“压力缓降-流量异常-可燃气体浓度升高-通风负荷变动”的时序特征，可通过多变量时序模型对压力、流量、阀位、压缩机电流、LEL 浓度、风机频率开展联合异常监测，识别持续偏移与突变脉冲。阈值自适应可结合装置负荷、环境温湿度、介质密度及启停状态完成动态调整，把固定报警点替换为“基线区间+置信带+变化率”的综合判断依据，针对夜间低负荷、工况切换场景单独构建模型，降低误报概率且维持对缓慢泄漏与间歇性喷放的监测敏感度。

3.2 失控反应与超温超压场景的因果推断与机理校验

失控反应多由投料偏差、催化剂活性变化、冷却失效或搅拌异常导致，超温超压表现为热量积累与放热速率上升的耦合链条。因果推断围绕“投料量-反应速率-温度-压力-放空/联锁”构建结构关系，区分相关性同升与真正驱动因素，机理校验将推断结果锚定在能量衡算、传热能力与设备设计极限，核查反应热估计与冷却负荷匹配度、放空能力对峰值生成速率的覆盖情况，为异常路径提供可追溯的变量贡献度，防止传感器漂移或阀位抖动误判为反应加速信号。

3.3 从点预警到面风险的装置级动态风险地图生成

点预警信号需映射到装置空间与功能单元，依据“设

备节点—管段—区域”建立拓扑图，将测点风险值投射至关键节点，沿物料与能量流向扩散，形成随时间滚动更新的动态风险地图^[3]。风险合成综合异常强度、持续时长、保护层可用状态、相邻单元连锁效应及人员暴露程度，将高频报警聚集区、关键屏障失效区域、隔离阀上下游压差异常区域以热区形式呈现；叠加作业票据与检维修状态，标注动火、受限空间等叠加风险，让处置资源依据风险梯度实现区域化调度及连锁策略联动。

4 预测结果到预防行动的闭环联动与现场落地机制设计

4.1 预警分级处置策略与连锁保护人机协同流程优化

预警分级需将风险值映射为可执行的处置脚本，“提示级—关注级—处置级—紧急级”与工艺窗口、变化率、保护层状态关联，明确操作边界与时间要求。连锁保护与人工处置需形成互补：处置级下发参数调节、旁路切换、降负荷与隔离建议，同步核查连锁投用状态、旁路阀位与关键阀门可达性；紧急级启动 SIS 前置检查与联动预案，明确可燃气体浓度、点火源控制与疏散要求。告警去重按同一设备、同一变量、短时间内重复触发合并，保留最高等级与首末触发时间；根因聚合将同一异常链上的多点报警归集至主因变量，输出关联拓扑与传播路径，一键处置需关联标准操作卡与连锁状态校验，防止旁路或测点失准时误操作。

4.2 作业行为识别与违章风险干预的智能管控路径

作业行为识别针对高危作业要素建立可计算规则，联动视频分析、定位轨迹、门禁刷卡与票据审批，完成“人—票—场—时—措”一致性校验。动火作业可核查防火隔离落实情况、气体检测频次达标状态、监护人员在岗情况；受限空间可监测通风开启状态、人员停留时长、救援器材就位情况^[4]。违章风险干预实行分层触发：轻微偏离通过弹窗与语音提示纠正，关键违章触发强提醒并要求复核，触及红线条件则联动门禁或冻结作业许可，现场截图、时间戳、票据编号与处置记录同步写入事件链，方便后续核查与复盘。

4.3 持续学习与模型更新的变更管理审计追溯体系

持续学习需将模型更新纳入装置变更管理，装置改造、测点迁移、控制策略调整、原料切换与季节性工况变化设为触发条件，建立训练数据版本、特征字典与阈值配置库。更新前执行回放验证，对比不同负荷、不同班次下关键指标的误报漏报差异，设定灰度上线策略，支持新旧模型并行输出监测漂移。审计追溯强调全链路留痕：数据来源、清洗规则、训练参数、审批记录、上线时间与回滚条件均

能追溯；每次告警关联对应模型版本与输入片段，确保事故调查与管理评估能定位到“何种模型在何种数据下给出何种判断”。

5 可信可解释与合规安全的工程化部署与成效评估体系

5.1 可解释输出与不确定性量化的决策可信度构建

可解释输出需将预警结论拆解为“关键变量贡献—异常形态—触发规则—处置建议”四类内容：明确温度、压力、流量、液位等变量的贡献排序、异常属于缓慢漂移或阶跃突变、匹配的工艺约束区间与连锁边界，展示与历史相似片段的对比趋势。不确定性量化可借助置信区间与校准曲线，伴随风险值输出对应可信度等级，区分数据缺失、传感器漂移、工况切换引发的低可信度预测，启动人工复核或临时提升采样与巡检频率。解释环节可提供“执行某操作后预期变化”的反事实参考，降低负荷或切换冷却系统后温度斜率回落区间可直观呈现，让预警从黑箱数值转变为可核验信号。

5.2 网络安全数据合规与模型安全防护的风险控制

数据合规依托分级分类与最小化原则推进，针对 DCS、SIS、视频及票据数据划定边界，对敏感字段完成脱敏并搭建访问审计体系；跨系统数据交换使用隔离区域与白名单接口，关键控制网络与办公网络实施物理或逻辑隔离，模型部署端契合工控安全规范不直接写入控制指令^[5]。模型安全防护涵盖数据投毒、对抗扰动与供应链风险：训练集增设完整性校验与异常样本筛查，关键特征划定合理取值范围与机理一致性核查，输入端对突发离群及伪造信号完成甄别；版本发布后执行签名核验与可回滚方案，权限依据角色划分，推理日志与告警记录加密留存，规避篡改引发错误处置或责任链中断。

5.3 安全绩效量化评估与组织能力提升的实施路线图

绩效评估可将预警系统的价值转化为可量化核算指标，单位时间高危预警命中率、误报工时占比、未遂事件提前量分布、处置闭环时长、重复隐患复发率、连锁触发次数及非计划停工损失变动，均可与装置负荷、检修周期、季节工况完成分层比对。预警系统建设依托能力成熟度逐步落地，测点与作业票据完成统一编码，数据质量看板与处置工单实现流程闭环，关键单元试点模型与预警分级处置完成部署，装置级风险地图与作业智能管控完成全域覆盖，长效更新与审计机制同步构建。组织能力建设同步推进，数据责任人、模型责任人、处置责任人形成三线协同体系，配套专项演练与岗位考核，推动各项指标优化落实到具体岗位操作中。

6 结语

人工智能助力化工事故预测与预防,推动安全管理从经验判断转向数据驱动与闭环管控。依托多源数据融合、清洗校准、前兆识别、因果校验及装置级风险映射,实现预警分级处置与联锁保护协同衔接,在作业行为管控与变更审计中搭建可追溯链条。未来发展中,机理约束与可解释输出可增强决策可靠程度,搭配网络安全与数据合规体系,支撑模型迭代优化与跨装置推广应用,助力行业实现本质安全与韧性运营目标。

[参考文献]

[1]丁添奕.化工安全生产培训质量的评估模型构建研究

[D].杭州:杭州电子科技大学,2025.

[2]唐娇娇.智能化工装备与系统的多尺度数据结构与安全效应的研究[D].广州:广东工业大学,2024.

[3]邵臣浩.面向化工企业的智能安全监管平台设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2024.

[4]袁雄军.化工企业风险免疫防控机制及应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.

[5]张锁江,彭孝军,朱旺喜,等.化学工程发展战略[M].北京:化学工业出版社,2022.

作者简介:李永超(1991—),男,汉族,内蒙古赤峰人,本科,中级工程师,研究方向为化工安全、管理等。